

## <報文>電氣弧光爐鋼浴の誘導電氣攪拌(第1報)

|     |  |
|-----|--|
| 著者  | 齋藤 恒三, 島貫 良一   |
| 雑誌名 | 東北大学選鑛製錬研究所彙報 = Bulletin of the Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University |
| 巻   | 7  |
| 号   | 1/2  |
| ページ | 177-184  |
| 発行年 | 1951-10-03   |
| URL | <a href="http://hdl.handle.net/10097/32091">http://hdl.handle.net/10097/32091</a>                        |

# 電氣弧光爐鋼浴の誘導電氣攪拌 (第1報)

齋藤恒三\* 島貫良一\*\*

On the Electromagnetic Induction Stirring in Arc Furnace Steelmaking. (I) By Tunezô SAITÔ and Ryôichi SHIMANUKI.

Economic, metallurgical and operational advantages are said to accrue from agitation of arc furnace heats by induction stirrer which is attached to outside of the furnace shell.

In the present study, the construction features of the first model of the stirrer which was designed to operate on three phases at 100 volts was described.

The distribution of flux density over the stirrer was measured under various conditions.

Employing mercury instead of molten steel, the bath motion of various amounts of mercury was observed under various flux densities.

When input power was 455 watts (100 volts), average flux density at 5 cm above the stirrer was about 1,000 gauss and that at 10 cm was about 250 gauss, that is, flux density decreased proportionally to the square of the distance. It was found that flux density of about 1,000 gauss was necessary to obtain proper stirring effect.

Another design for the second model was proposed in order to obtain more effective stirring effect.

(Received June 25, 1951)

## 1. 緒 言

製鋼作業に於ては鋼浴と鋼滓とを十分に接觸させて精錬反應を促進、完遂させることが肝要であるが、このために普通骨の折れる人力による攪拌が行はれている。大型爐になるとその作業も益々困難になりしかも到底完璧を期しえない。勿論熔鋼の對流による若干の攪拌はあるが、その効果は微弱である。従つて人力攪拌の代りに誘導電磁場により自由に容易に攪拌出来ればこれによる利點は甚だ大きい。即ち製鋼時間及び電力が節約せられ均質な良質鋼がえられると同時に又溫度調節、除滓作業等も容易となる。

スエーデンに於ては斯る利點に着目し、1936年頃より誘導電氣攪拌の研究<sup>1)</sup>を開始し、1948年より1949年迄約1年半の現場研究<sup>2, 3)</sup>を経て上記の諸利點を確認、報告<sup>4~6)</sup>しているが、この場合使用した攪拌機の構造、諸性能に關する詳細は記載されていない。

製鋼反應に限らず一般に化學反應の促進には攪拌が重要なことは言を俟たぬ所であるから先づ第一には簡単な設備で有効な攪拌が出来る様な考案が必要であらう。

攪拌原理は交流電動機動作原理と同様であるが、攪拌機として要求される諸性能は電動機のそれとは異り種々研究の余地があると思はれる。従つて試作試験を経て漸次理想的設計に近接する目的を以て、第一回試作機としては100 HP電動機の鐵心を利用し實驗室的なものを製作した。是に就いてその電氣的諸特性を調査し又攪拌狀況を鋼浴の代りに水銀を用ひて觀察し次回設計の資料をえた。未だ豫備實驗であつて實驗、考察共に不充分であるが遂次研究を進める予定である。

選鑛製鍊研究所報告 第115號

\* 東北大學教授 選鑛製鍊研究所勤務 工學博士

\*\* 選鑛製鍊研究所勤務 工學士

1) Dreyfus, L.: *Jernkontorets Annaler*, 133 (1949), 371.

2) Nilsson, F.: *ibid.* 133 (1949), 385.

3) Fornander, S.: *ibid.* 133 (1949), 453.

4) Kopecki, E. S.: *Iron Age*, 164 (1949) Sept. 22; 73.

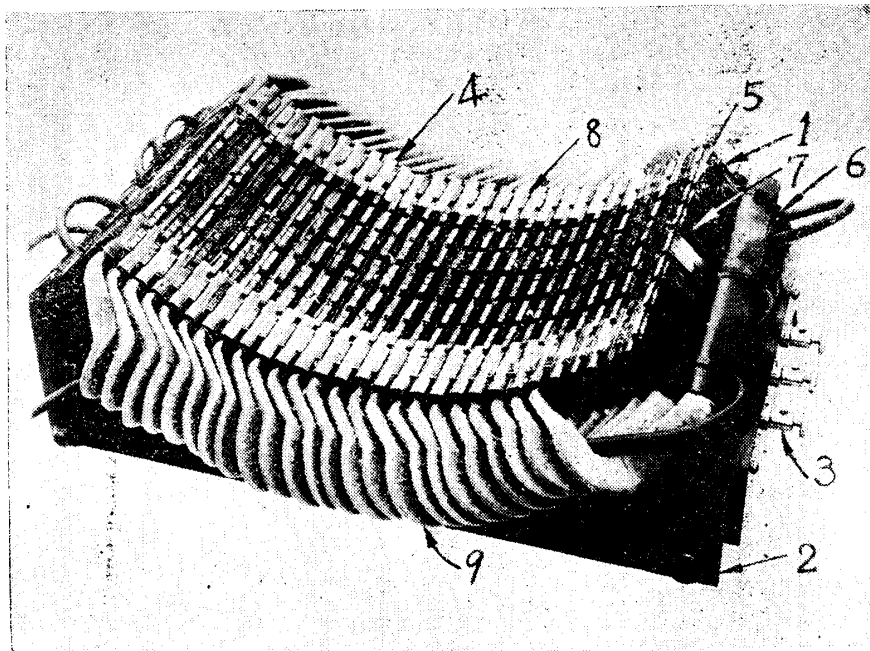
5) Fornander, S. and F. Nilsson: *J. Metals*, 188 (1950), 22; 256.

6) スエーデンに於ける現場研究の結果によると、製鋼時間の短縮、生産増加は約20%と報告されている。この詳細に就いては著者の一人が、*金屬誌*, 15 A (1951), 121. に綜説した。

## 2. 誘導攪拌機

### A) 第一回試作機の構造

熔鋼の誘導攪拌原理は一般の誘導電動機のそれと類似であつて、交番電流により熔鋼内に誘起された渦電流と移動磁界との相互作用にもとづくものである。茲に報告する第一回試作機の全貌は Photo. 1 に示す通りで100 HP 誘導電動機の固定子用珪素鋼板(厚さ0.36 mm, Fig. 1 参照)を利用し、これを Fig. 2 の如く重ねて鉄心部分を作り、これに對して Fig. 3 に示す型巻線輪(formed coil)を2層全節巻星形結線方法(Fig. 4)を以て3相巻線を行ひ、3相交流勵磁による移動磁界發生裝置即ち誘導攪拌機を試作した。Figs. 1, 2 及び 4 より明かに本試作機の極數は4, 每極每相當りの溝數は2で、溝總數30の中その3/5の各溝に入る型巻線輪が2層となつている。



- 1: Iron core
- 2: Flame
- 3: Terminal
- 4: Wedge made of bamboo
- 5: Slot for the cooling pipe
- 6: Slot for the cooling air (in the present exp., this was used for the cooling water pipe)
- 7: Core block No. 4
- 8: Core tooth No. 19
- 9: Formed coil

Photo. 1 The First Model of the Induction Stirrer.

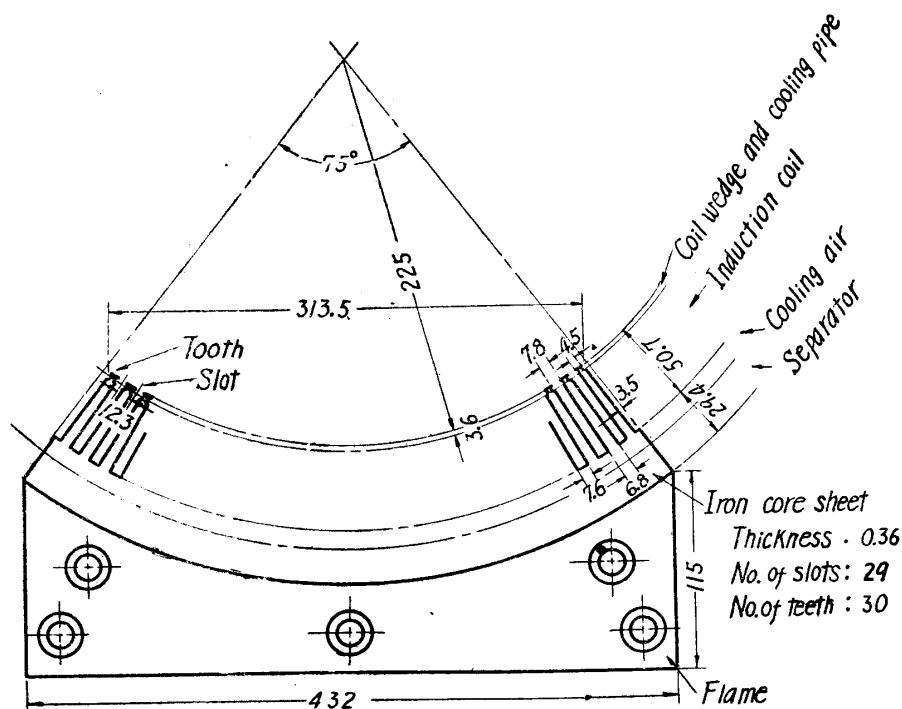


Fig. 1 Stirrer Core and Flame (unit: mm).

鐵心部分としては實際の高温操業時の冷却効果を考慮して Fig. 2 に示す如く 20mm 幅の 8 個の磁心帯を 6.8mm 幅の空隙を隔てて配置製作した。即ち各磁心帯の間隙、誘導捲線帯の上部 (Photo. 1 の 5 に示す位置) へは冷却用銅管を、誘導捲線帯と隔離板 (separator) との間隙 (Photo. 1 の 6) へは送風機により冷却風を導く意圖をもつものである。

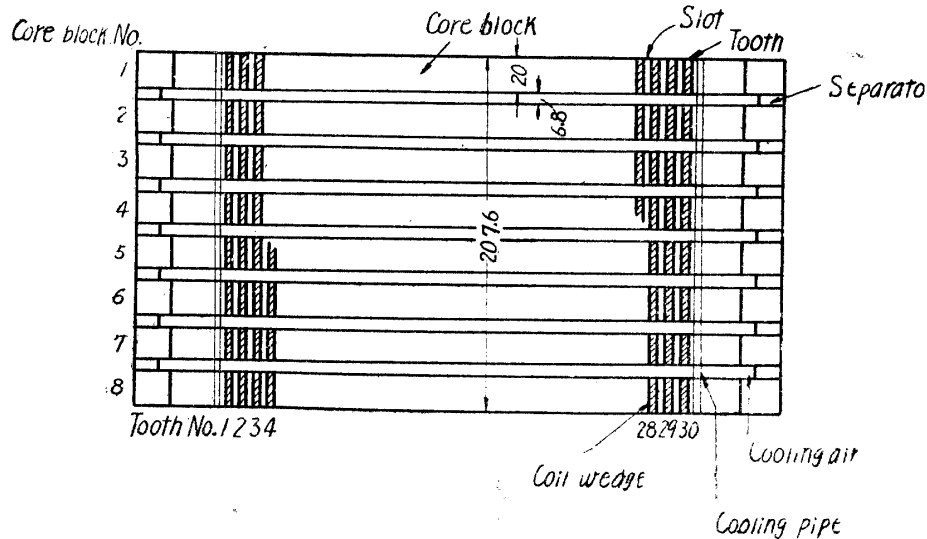


Fig. 2 Plan of Stirrer Core.

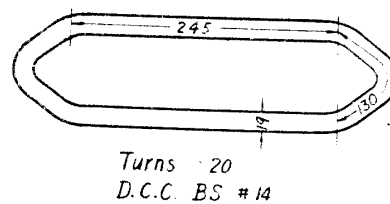


Fig. 3 Formed Coil.

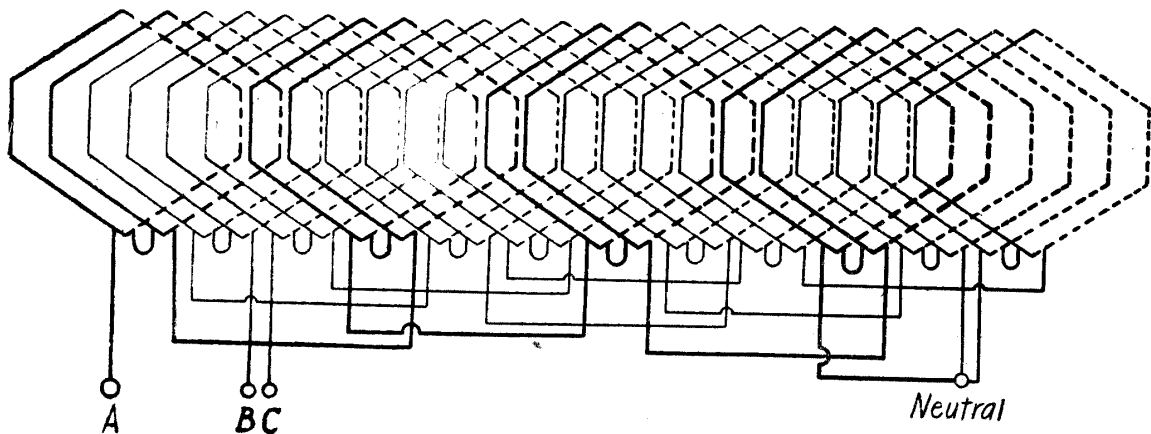


Fig. 4 Winding of the First Model.

Double layer and full-pitch winding, 4-poles, 2 slots per pole per phase, star-connection.

今回の常温試験に於ては實際の電氣爐殻 (非磁性材料) に模してアルミニウム或は銅薄板 (厚さ約 1mm) 製爐殻を作り、その中に耐火モルタルを適量入れて模擬的電氣爐とし、2, 3 の豫備實驗を行つた。この際上述の冷却溝 (Photo. 1 の 6) に冷却水用ゴム管を配し或程度の放熱効果をあげることが出来た。高温操業時の攪拌機冷却の問題は重要であり捲線被覆の絶縁低下或ひは破壊防止のためには耐熱性材料例へば石棉或ひは合成樹脂を被覆した導線を使用することゝならう。

## B) 考 察

a) 周波数について 交流電動機に於ては, 固定子電圧の周波数  $f$  (cycle/sec), 磁界磁極の対数  $p$  及び其の廻轉數  $n$  (rpm) の間には次式の關係がある.

$$n = 60f/p.$$

電動機固定子と殆んど同一構造内容を有する本攪拌機に於ても本關係は成立する. 依つて本試験機に於ては  $p$  は2, 磁界鐵心の實效長は約 27 cm であり, 商用周波数 50 cycle/secを其の儘使用したから, 磁界の移動速度は約 400 m/min である. 此の速度を上昇せしめるには  $f$  の増加と  $p$  の減少とが考へられるが, 周波数 及び 極數を變へた場合に於ける鋼浴攪拌効果 其の他は後報に譲る.

b) 力率について 攪拌機に於ては鋼浴迄の間隙が大であるからその負荷時即ち鋼浴攪拌中を考へると電動機にみられる程の負荷電流は認められずベクトルの考へて殆んど大部分が端子電壓より  $90^\circ$  遅れた位相の勵磁電流であると考へられるので力率の低下は當然である.

Table 1 Power Factor of the First Model.

|                                 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Terminal voltage (V)            | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   | 100  |
| Line current (A)                | 2.46 | 3.45 | 4.50 | 5.58 | 6.67 | 7.78 | 8.80 | 10.0 | 11.0 |
| Effective power (W)             | 26   | 51.5 | 87.5 | 129  | 192  | 263  | 344  | 430  | 455  |
| Power factor $\cos \varphi$ (%) | 30.5 | 28.7 | 28.1 | 26.6 | 27.6 | 27.8 | 28.2 | 27.5 | 23.3 |

Table 1はライニングの厚さ約 3 cm, 1 mm 厚のアルミニウム爐殻を使用した場合の力率測定結果である. アルミニウム板の代りに銅板を使用した場合, 水銀量, ライニングの厚さを種々變へた場合等に於ける測定結果も上表と大差がないから省略する. 表示の如き低力率を如何に補償するかは今後の重要な課題で普通一般には各種の進相機或ひは蓄電器の併用が考へられる.

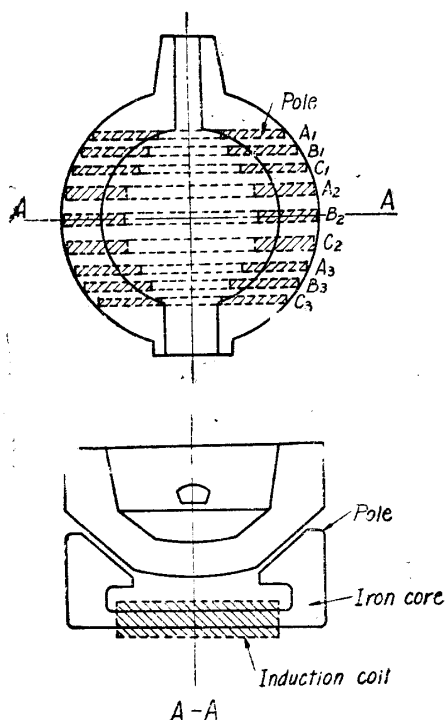


Fig. 5 The Second Model.

配置出来るから, 絶縁, 冷却の問題も相當緩和されしかも鎖形捲線方式に較べて構造簡單製作容易である.

次回試作機に於ては上記の諸點に考慮を拂ひ設計製作する豫定である.

c) 構造について 攪拌機に於ては電動機と異り必ずしも正弦波形の磁束分布を必要としないから電動機について種々考究されてゐる正弦波形に近接せしめる手段即ち多相交流による2層短節捲の採用, 每極每相の溝數の増加等は閑却されてよく寧ろ3相以下, 單層全節(鎖形)捲, 每極每相の溝數2以下が望まれる. 即ち後者の方式は構造簡單であり且幅の廣い齒及び溝を有する鐵心を使用出来るから斷面積の大きい即ちアンペアターンの大きい扁平な型巻線輪が使用出来, 強起磁力發生の目的に適してゐる.

次に攪拌機は爐殻及びライニングを距て、相當遠距離にある鋼浴迄強磁力を到達させねばならぬが一般電動機と類似の鐵心構造を採用した場合には各々對となる磁極は夫々隣り合せて配置され従つて磁力線の通路は鐵心表面の近傍に限定され遠方迄到達しない. 従つて Fig. 5 に示す如く爐底部の左右に各々對となる磁極を分離配置し、之に前記分布捲よりも強磁力發生の點に於て優れてゐる集中捲方式を採用すると磁力線は十分爐内の鋼浴に到達しうるものと推定される. 更に, 圖示の如く捲線部分を爐體より離して

### 3. 磁 束 分 布

第一回試作攪拌機上の空間に於ける移動磁界の磁束分布測定に當つては Photo. 2 にみられる様に搜索線輪に誘起された起電力を入力インピーダンスの高い A 型真空管電圧計により測定する方法を採用した。

本攪拌機により搜索線輪に誘起される起電力は正弦波形ではないが、正弦波形の場合に成立する次式を使用して磁束密度分布の凡の目安をうることにした。

$$\phi = \frac{E_{\text{eff}}}{2.22 f N S} \times 10^8$$

茲に  $\phi$ : 磁束密度 (gauss),  $E$ : 搜索線輪に誘起された起電力の実効値 (V),  $f$ : 電源周波数 (cycle/sec),  $N$ : 搜索線輪の全捲数,  $S$ : 搜索線輪の実効面積 ( $\text{cm}^2$ ) である。

本測定の搜索線輪としては、1 inch 直径のベークライトボビンに ES #36 エナメル線を夫々 400 回及び 800 回捲いたものを使用した。その実効面積としては簡単に内径及び外径の平均を有効径として計算する範囲にとどめた。

磁束測定に當つては Photo. 2 に示す様に杵を設けて鉄心の曲率中心 (Photo. 2 中の 3) と搜索線輪の回転中心を一致せしめ、指高針 (Photo. 2 中の 2) 及び回転用木製軸 (Photo. 2 中の 4) により鉄心の各歯の上に線輪を運び、斯くして鉄心上全面の磁束密度を逐一測定したが、その測定結果の代表例として起磁力 455 W, 100 V に於けるものを Figs. 6, 7, 8 及び 9 に示す。

攪拌機上の空間に於ける磁束密度は下述の如く鉄心表面よりの距離の自乗に逆比例するから搜索線輪中の磁束密度分布は一様ではない。従つてこれ等の測定値は直径 1 inch 圓面積内の平均磁束密度分布を示すものである。Figs. 6 及び 7 の測定結果は磁心帯 No. 4 上の磁束密度分布即ち磁界移動方向に平行な縦軸上の分布であり、Figs. 8 及び 9 に示すものは磁心歯 No. 19 上のそれで前者と直角の横軸上のものであるが、鉄心端部を除き他の場所の磁束分布もこれ等と殆んど同型同値を示したので省略した。

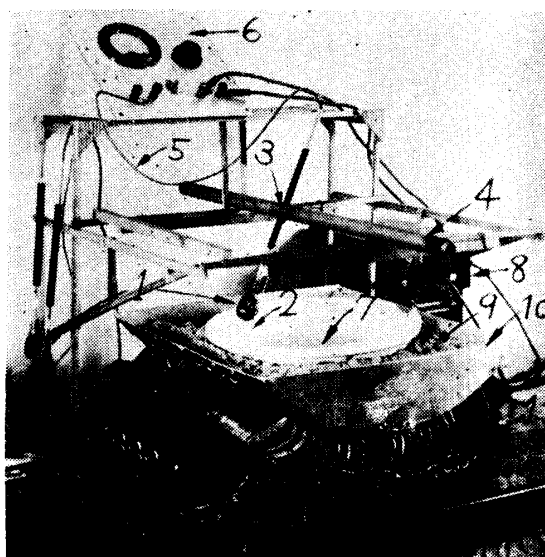


Photo. 2 Apparatus for the Measurement of Flux Density.

- 1: Search coil
- 2: Needle to determine the height of the search coil
- 3: Center of curvature of stirrer surface
- 4: Rotation axis of search coil
- 5: Shield wire
- 6: A-type valve voltmeter
- 7: Mercury bath
- 8: 6V battery for valve voltmeter
- 9: Mortar lining
- 10: Furnace shell made of aluminium
- 11: The first model of the induction stirrer

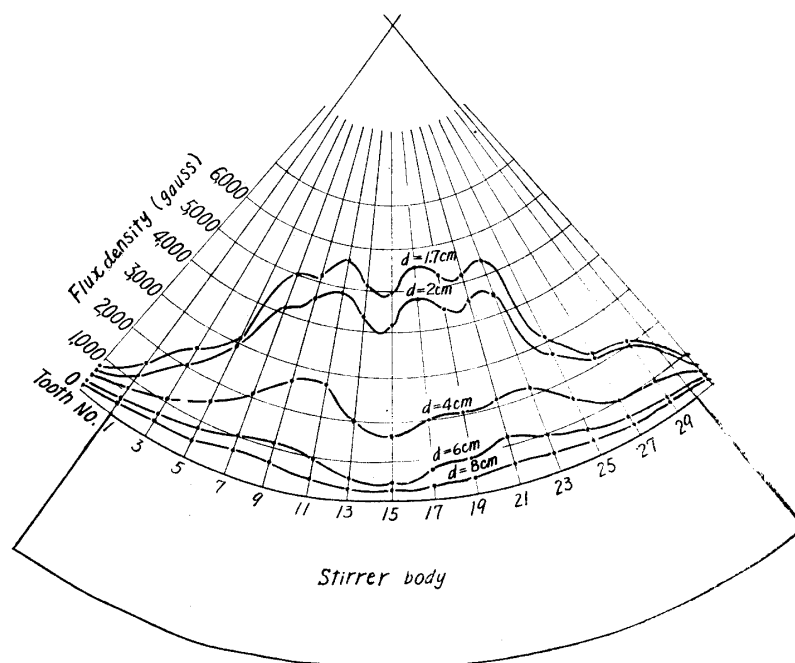


Fig. 6 Longitudinal Distribution of Flux Density over the Stirrer Core Block No. 4 at 455 W and 100 V.  
d: Distance from the surface of the stirrer body

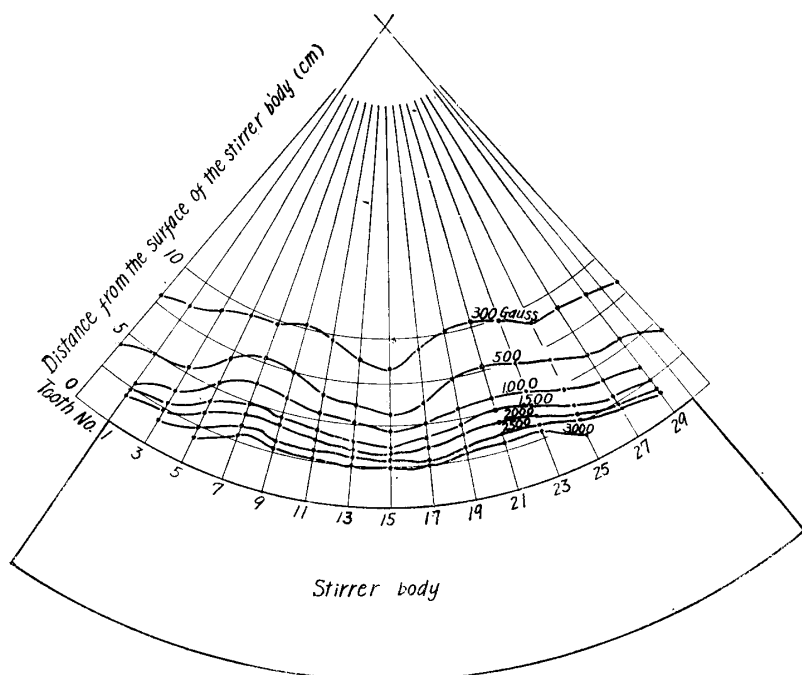


Fig. 7 Longitudinal Distribution of Flux Density over the Stirrer Core Block No. 4 at 455 W and 100 V (equi-flux lines).

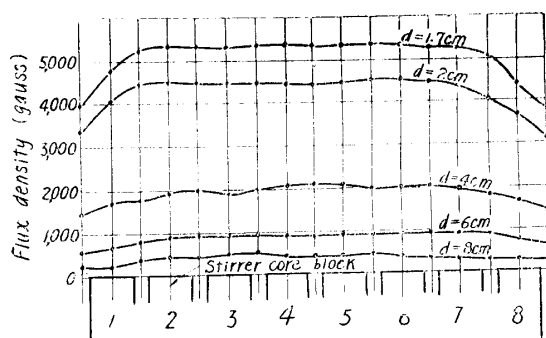


Fig. 8 Lateral Distribution of Flux Density over the Core Tooth No. 19 at 455 W and 100 V.

$d$ : Distance from the surface of the stirrer body

#### 4. 攪拌状況

高温に於ける鋼浴の攪拌状況を知る第一段階として鋼浴の代りに水銀を、熔滓の代りにヒマシ

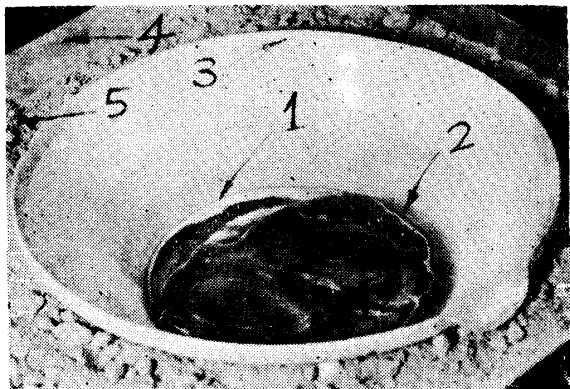


Photo. 3 Bath Motion (Type A).

特に縦軸上の磁束分布には不規則な凹凸がみられるが、これは製作時に於ける捲線及び鉄心の不均一性によるものであらう。

以上、100 V, 455 W の測定結果によると、鉄心の中心部に於て鉄心表面よりの距離 1 cm では 5,000 gauss 以上、5 cm では約 1,000 gauss, 10 cm で約 250 gauss に減じ、16 cm になると殆んど測定されない程度である。この結果にみられる様に磁束密度は距離の自乗に反比例している。尚、模擬爐殻としてアルミニウム或ひは銅薄板を用い測定した結果は本測定精度では上記と殆んど差を認めることが出来なかつた。

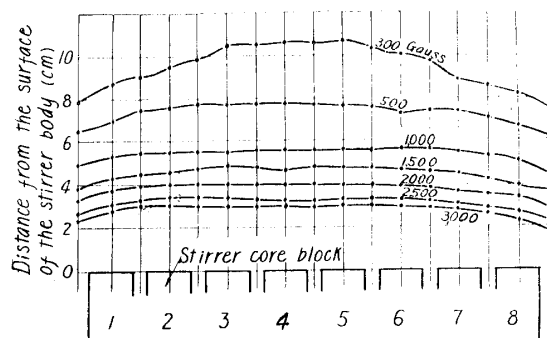


Fig. 9 Lateral Distribution of Flux Density over the Core Tooth No. 19 at 455 W and 100 V (equi-flux lines).

- 1: Emerging mercury
- 2: Castor oil
- 3: Porcelain vessel
- 4: Aluminium plate
- 5: Mortar

油を用ひ是等の攪拌状況(速度及び方向)を観察した。

熔融金属を磁界移動方向に運ぶ力は移動磁界と金属浴内に誘起された渦電流との相互作用にもとづくが、これにさからひ金属浴及び熔滓の粘性、重量及びこれ等と爐壁との摩擦等が働き平衡する。鋼浴及び熔滓

の攪拌と水銀及びヒマシ油のそれとでは攪拌にあづかるこれ等の諸因子にかなりの差違があるからその攪拌速度にも相當の相違があるものと推察されるが、この點に就いては次報に於て詳述することゝし以下に水銀及びヒマシ油を使用した場合の攪拌状況の大凡を記載する。

水銀量及び水銀と攪拌機との距離を種々變へて實驗、觀察の結果、攪拌状況を Figs. 10, 11 及び 12 に示す如く便宜上 A, B 及び C 型に大別することが出來た。

Fig. 10 に示す A 型攪拌に於ては爐底部及び中央表面の水銀が磁界の移動方向に移行し此の流動が爐壁に衝突して突出しつゝ左右に分離し 2 つの對稱的な半圓を描くもので水銀量の比較的僅少な場合には見られる。Photo. 3 に示すものは此の A 型に屬するもので、Photo. 3 では向つて右下から左上へ水銀が移動攪拌され 1 の部分で押上げられて左右に分れ、從つて全體として容器内の右方の液面が降下し、ヒマシ油はこの液面降下部に移る。この場合の水銀量は約 5 kg でこれより水銀量が増加するに従ひ漸次下述 B 型乃至 C 型攪拌に移る。

Fig. 12 に示す C 型攪拌は攪拌機の容量に比べて水銀量が多量の場合にみられるもので、浴の底部にのみ移動磁界が働くから、磁界移動方向に移動した底流の末端は容器壁に沿つて押上げられヒマシ油層を押開き、次に磁界移動方向と逆の表面流となつて移行し、水銀は容器内で全體として上下の廻轉流動をする。

B 型攪拌は Fig. 11 に示す如く A 型と C 型との中間的なもので水銀量約 8~10 kg の場合に觀察された。即ち水銀量が比較的多く從つて磁界の及ぶ有効範圍が浴の底部及び表面の極く一部に限られ、強力な底流が逆方向に移動する中央の表面流と衝突し圖示の如き流動方向及び速度が不規則な混合帶を形成する。この混合帶は水

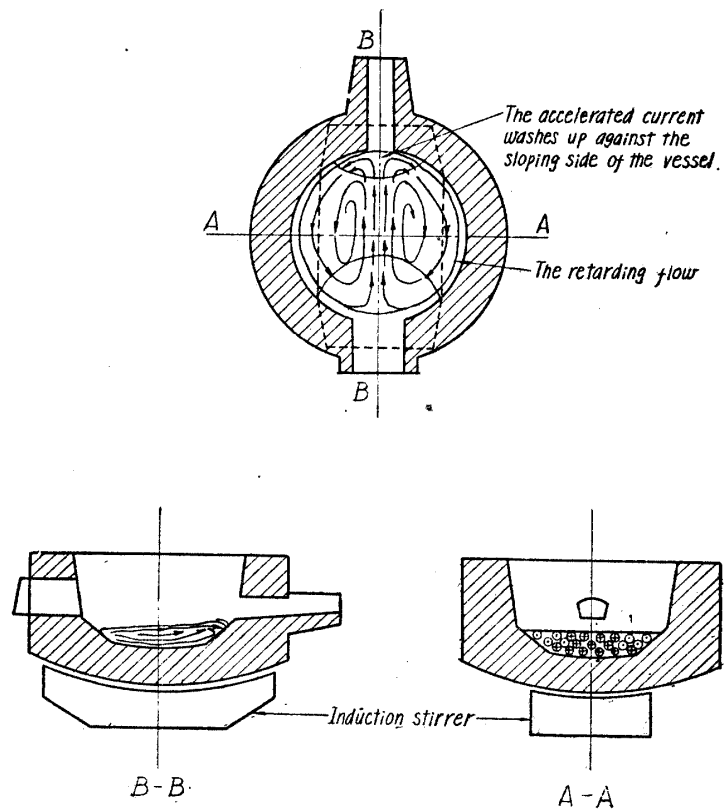


Fig. 10 Bath Motion (Type A).

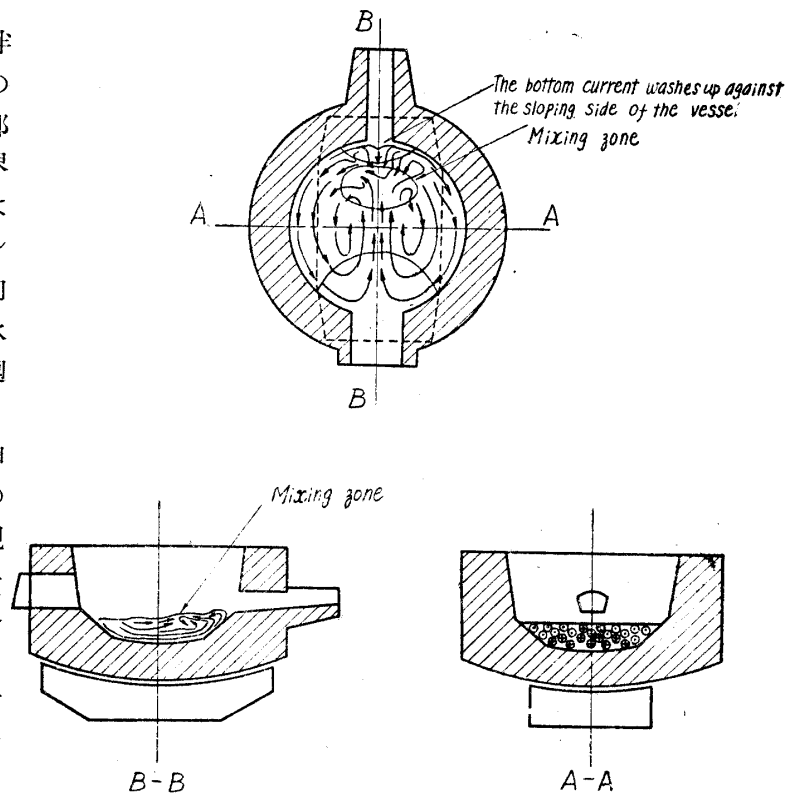


Fig. 11 Bath Motion (Type B).



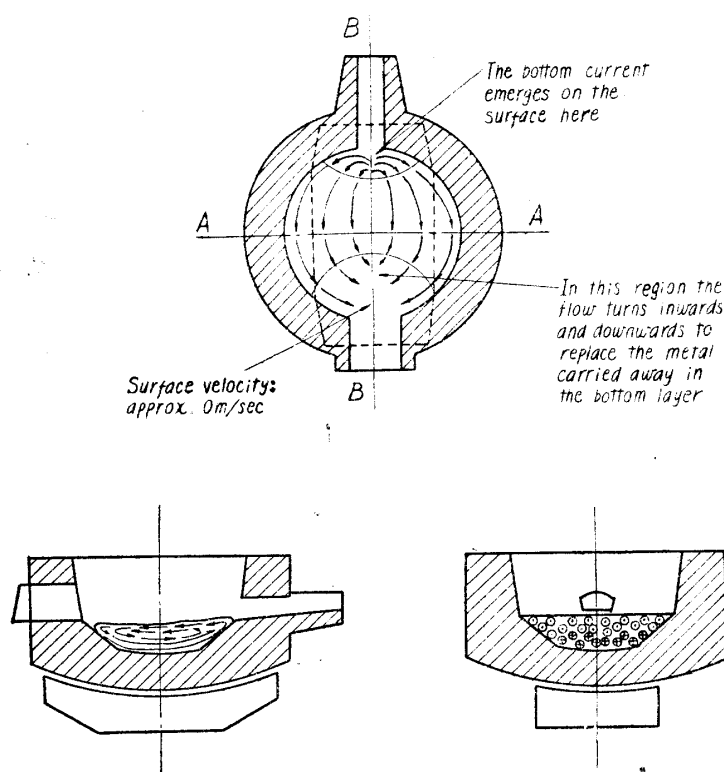


Fig. 12 Bath Motion (Type C).

銀量の増加に伴ひ後退し遂には C 型の攪拌にうつる。

水銀浴内各部の攪拌速度は勿論水銀量及び攪拌入力により左右されるが一例として水銀量 5 kg, 100 V, 455 W の場合につき表面速度の概略測定を行つた。即ち水銀表面に浮遊させた微小紙片の移動速度を秒時計で多数回測定して大凡の目安をえた。その結果は Table 2 に示す通りであるが、これは水銀自體の移動速度よりも幾分小であらう。Table 中 (a) は容器中央に於ける直線状移動速度であり、(b) は圓周上に於ける最大速度である。この結果から判る様に鐵心中央部、距離 10 cm の場所即ち磁束密度約 250 gauss では、水銀表面の攪拌を殆んど認めることが出来なかつた。尚浴底部に於ける速度はかなり早いものと觀察された。

Table 2 Surface Velocity of Mercury Bath.

| Distance between the bottom of the bath and the surface of the stirrer (cm) | 0.5 | 1.5 | 2.5 | 3.5 | 4.5 | 5.5 |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| (a) Center velocity (cm/sec)  | 14  | 10  | 7.5 | 5.0 | 3.8 | 2.2 |
| (b) Circular velocity (cm/sec)  | 9.2 | 7.5 | 5.7 | 3.8 | 2.6 | 1.5 |

## 5. 結 言

電氣弧光爐に誘導攪拌を施すと多くの利點があるから先づ誘導攪拌機の試作研究を行つた。

今回は取敢へず手持資材を使用して試作した小型機につき簡単な電氣的實驗及び考察を行ひ、又鋼浴の代りに水銀を用ひてその攪拌狀況の觀測を行つた。

本試作機の攪拌能力及び電氣的諸特性は尙極めて不充分であるから上記の實驗結果及び考察を基にし遂次改良を加へ更に製鋼試驗を行ふ豫定でいる。

本研究を行ふに當り本學電氣工學科大内三千三氏に種々の援助を賜つた。茲に記して謝意を表する。本研究費の一部は文部省科學研究費の補助による。